

参赛密码 _____
(由组委会填写)

第十二届“中关村青联杯”全国研究生
数学建模竞赛

学 校 西南石油大学

参赛队号 10615003

队员姓名 1. 陈琳

 2. 刘浩生

 3. 罗仕明



第十二届“中关村青联杯”全国研究生 数学建模竞赛

题 目 分块分层优化的旅游路线规划问题研究

摘 要

旅游活动不仅能够驱动全球经济的发展，而且是人民追求幸福生活的最重要方式之一。我国特别将发展旅游业作为经济结构转型、驱动内需和提升人民生活品质的目标之一。研究旅游路线规划问题，对普及旅游活动和发展旅游业起着举足轻重的作用。本文为了更好地解决旅游路线规划问题，利用聚类分块和分块分层优化的思想，根据图论、最优化和模糊数学等的理论与方法，在将景点间的公路统一转化为普通公路、省会城市间统一为高速公路及对问题四用模糊综合评价排序挑选出旅游景点后，针对不同问题，利用邻近距离聚类构建了具有不同权值含义的分块加权网络图和分块动态网络图；建立了改进的单目标和多目标的旅行商问题（TSP）模型、改进的多旅行商问题（MTSP）模型、最少旅游年数的优化模型、旅游体验最好和费用最少优化模型等；设计了它们的求解算法，特别针对改进的 TSP 模型，提出了解单目标 TSP 模型的改进模拟退火算法和基于分层序列法的改进模拟退火算法；并借助元胞数据提取技术和 *Matlab* 软件编程，获得了满足各问题要求的旅游路线最佳规划方案。主要工作如下：

针对问题一，利用图论中的组合优化、单目标和多目标优化及模拟退火等的理论和方法，为常驻西安市的旅游者游遍 201 个 5A 级景区规划了最少年数的最佳旅行路线。首先，利用近邻聚类的思想对景点进行区块划分，构建了含区块划分的旅游网络图（见图 5）；然后，对每次旅游时间、旅行过程中的行车和游览时间进行约束，建立了基于 TSP 的最佳旅游路线规划模型对各区块内景点进行最佳路线规划，再建立基于 MTSP 的改进模型寻求各区块间的最佳旅游路线；其次，以旅游总年数最少、每年旅行时间接近 30 天为目标，建立一个关于旅游年数的分堆优化模型；再其次，分析了各模型的特点，提出了解决这些模型的算法思想和求解步骤，特别针对改进的 TSP 模型具有多约束条件的特点，依据求解 TSP 模型的模拟退火算法的思想，提出了改进的模拟退火算法；最后，利用元胞数据方法和 *Matlab* 软件编程，计算得到了旅游者至少需 11 年才能游遍所有 5A 级景区，并获得了每一年中旅游的次数、每一次旅游的区块和时间（见表 4）、以及每次旅行中每天的具体行程方案。文中仅以旅游河北省区块为例示意说明，表 5 和图 6 展示了游览河北省区块的景点需要 9 天及 9 天中每天的旅游行程，其余 28 次旅游路线规划方案见附件 1。

针对问题二，综合考虑多种出行方式，为旅游者规划费用最优、旅游体验最好的十

年旅游路线。在问题一的基础上，首先，基于各区块内的最少旅游时间，建立各区块内租车费用、耗油费、住宿费用的计算模型；然后，基于建立的旅行十年期限中剩余最大出行时间的计算模型，考虑出行方式所产生的费用和时间的矛盾，建立基于出行时间的最小费用的旅游路线规划的多目标 TSP 优化模型，规划各个省之间进行旅行时的最佳旅游路线、获得十年内最少的出行时间；其次，基于十年内游遍所有 5A 景点剩余的游览时间，提出了分配剩余时间来增加各景点的至少游览时间，使得旅游者达到最好旅游体验的方案；最后，利用元胞数据方法和 *Matlab* 软件编程，计算得到十年之旅的最少费用为 32.6 万元，并给出了旅游北京、天津区块的费用最优、旅游体验最好的旅游线路，含每天所需费用以及每天具体行程（见表 7、图 9）的示例说明，其余 26 次旅游路线见附件 2。

针对问题三，依据自驾游的特点，采用动态赋权的方法对第二问所建立的模型加以改进和推广，为了刻画旅游者的出发位置对整个网络图的影响，首先构建了动态的旅游网络图；然后基于动态的旅游网络图，根据自驾游的特点确定动态网络图的权值；其次利用问题二中的基于旅游时间年限的多目标优化模型及求解算法，通过编程计算，为常住地在北京市的旅游者规划十年游遍所有 5A 景点的旅游方案，以四川省区块为例示意说明（见表 10、图 11）；最后根据旅游方案结果，为自驾游爱好者和旅游相关部门给出了相关建议。

针对问题四，基于用模糊综合评价从众多不同级别景点筛选出的旅游景点，综合采用问题一和二的方法为旅游爱好者规划旅游路线。首先依据旅游者在面对众多不同级别景点作旅行计划时，并不一定是以景点级别高优先选择的原则，而往往是通过对比景点的相应指标与自身旅游偏好进行优先挑选，通过分析附件 6、7 中的旅游景区评定的相关信息和旅游者对旅游的偏好，建立旅游景点选择的评价指标体系；然后建立挑选景点的模糊综合评价模型，确定旅游者对每个景点的优先级排序，进而确定出十年内计划旅游的景点；其次针对选中的旅游景点，按问题一和二中的方法为旅游爱好者做出十年最优旅游路线的规划；最后通过 *Matlab* 软件编程，为常住地址为北京市的自驾游爱好者规划了更符合实际的最佳十年旅行路线，并给出一次旅行游览 15 个优先旅游景点的路线图，见图 12。

最后，对四个问题的模型与求解方法进行了评价，并给出了改进方向建议

关键词：旅游路线规划；网络优化；TSP 模型；模拟退火算法；分层序列法

目 录

摘 要.....	1
1 问题重述.....	4
1.1 问题背景.....	4
1.2 问题的提出.....	4
2 问题分析.....	5
2.1 整体分析.....	5
2.2 对每个问题的分析.....	6
3 模型的假设与符号说明.....	7
3.1 模型的假设.....	7
3.2 模型的符号说明.....	7
4 模型的建立与求解.....	8
4.1 问题一的模型建立与求解.....	8
4.1.1 旅游网络图的建立.....	8
4.1.2 基于 TSP 问题的各区块内景点的最佳旅游路线规划模型.....	9
4.1.3 基于 MTSP 的改进寻求各省最佳旅游路线模型.....	11
4.1.4 旅游总年数的规划模型.....	14
4.1.5 问题一的模型求解与结果分析.....	15
4.2 问题二的模型建立与求解.....	20
4.2.1 各区块内的租车、耗油、住房费用的计算模型.....	21
4.2.2 旅行 10 年期限中剩余出行时间的计算模型.....	22
4.2.3 基于出行时间的最小费用的旅游路线规划模型.....	22
4.2.4 各景点体验最好的旅游时间.....	23
4.2.5 问题二的模型求解.....	24
4.2.6 结果分析与检验.....	27
4.3 问题三的模型建立与求解.....	28
4.3.1 基于旅游者的常住地址的动态网络图.....	28
4.3.2 基于自驾游的特点确定动态网络图中的权值.....	28
4.3.3 常住地址为北京市的旅游者的十年旅游规划结果.....	29
4.3.4 给旅游爱好者的建议.....	31
4.3.5 给旅游有关部门的建议.....	32
4.4 问题四的模型建立与求解.....	33
4.4.1 基于旅游者的旅游偏好对 4A、5A 级景点进行模糊综合评判.....	33
4.4.2 基于优先旅游景点的最佳十年旅行路线规划.....	34
4.4.3 问题四的模型求解与分析.....	35
5 模型的评价与改进方向.....	36
5.1 模型的优缺点.....	36
5.2 模型的改进方向.....	36
参考文献.....	37
附件清单.....	38
附录.....	38

1 问题重述

1.1 问题背景

旅游活动正在成为驱动全球经济发展的重要动力之一，因为它可加速国际资金流转和信息、技术管理的传播，创造高效率消费行为模式、需求和价值等。目前世界各国都在大力发展旅游业，我国也将发展旅游业作为经济结构转型、驱动内需和提升人民生活品质的目标之一。随着我国国民经济的快速发展，人们生活水平已经得到了很大提升，越来越多的人都将追求幸福的生活方式，旅游活动是其最重要的方式之一。旅游活动是带有暂时性、异地性特点的移动，是受旅游区（点）、经济状况、交通和道路条件、旅游市场、旅游时间等因素制约，因此旅游路线的规划对于旅游者至关重要^[1-4]。为了使旅游者达到游览的内容丰富多彩、进出便捷、避免迂回和往复、观览点疏密相间等目的，必须依据旅游者的时间、经济能力和旅游需求等，对出行的方式、路线的选择、景点的选择、食宿安排等问题进行综合优化，以做出最佳的旅游路线规划。

1.2 问题的提出

依据题目所给的信息和要求，问题要求在如下条件下，针对至少 201 个旅游景点研究 4 个旅游路线规划问题。

- (1) 出行方式：完全自驾游方式和乘高铁或飞机到省会再租车自驾到景点的方式；
- (2) 外出旅游时间：每年有不超过 30 天，每次不超过 15 天；
- (3) 外出旅游的次数：每年不超过 4 次；
- (4) 景区的游览时间：依据个人旅游偏好确定了在每个景区最少的游览时间；
- (5) 行车时间：基于安全考虑，行车时间限定于每天 7:00 至 19:00 之间，每天开车时间不超过 8 小时；
- (6) 每天的行程安排：若安排全天游览则开车时间控制在 3 小时内，安排半天景点游览，开车时间控制在 5 小时内；
- (7) 行车速度：在高速公路上的行车平均速度为 90 公里/小时，在普通公路上的行车平均速度为 40 公里/小时；
- (8) 停留时间：该旅游爱好者计划在每一个省会城市至少停留 24 小时，以安排专门时间去游览城市特色建筑和体验当地风土人情（不安排景区浏览）；
- (9) 景区开放时间：统一为 8:00 至 18:00。

问题 1：已知各景区到相邻城市的道路和行车时间参考信息，国家高速公路相关信息，各省会城市之间高速公路路网相关信息。请在高速优先的策略下，设计自驾旅游合适的行车线路方法，建立数学模型，并以旅游爱好者的常住地在西安市为例，规划设计旅游线路，试确定游遍 201 个 5A 级景区至少需要几年？并给出每一次旅游的具体行程，包含每一天的出发地、行车时间、行车里程、游览景区；若有必要，其他更详细表达请另列附件。

问题 2：依据附件 4 给出的若干城市之间的高铁票价和相关信息（约定：选择高铁出行要求当天乘坐高铁的时间不超过 6 个小时，乘坐高铁或飞机的当天至多安排半天的景区游览）、附件 5 给出的若干省会城市之间的机票全价价格信息（含机场建设费），在

高速公路的油耗加过路费平均为 1.00 元/公里,普通公路上油耗平均为 0.60 元/公里油费、租车费用 300 元/天、租车和还车在同一城市,住宿费为省会城市和旅游景区 200 元/人·天,地级市 150 元/人·天,县城 100 元/人·天(附件 1 中给出了各景区所在地的信息,若景区位于某城市市区或近郊,则这类景区的市内交通费用已计入住宿费中,不再另计),每一个景区最长逗留时间不超过附件 1 给出的最少时间的 2 倍下,综合考虑前述全程自驾、先乘坐高铁或飞机到达省会城市后再租车自驾到景区等出行方式,建立数学模型为一家 3 人同行的旅游爱好者,设计一个十年游遍所有 201 个 5A 景区、费用最优、旅游体验最好的旅游线路,给出每一次旅游的具体线路(含每次具体出行方式;每一天的出发地、费用、路途时间、游览景区、每个景区的游览时间)。

问题 3: 能否在第二问所建立的模型基础上加以推广,可以为全国的自驾游爱好者规划设计类似的旅游线路,进而给出常住地在北京市的自驾游爱好者的十年旅游计划;根据上述三问的结果给旅游爱好者和旅游有关部门提出建议。

问题 4: 自 2007 年 3 月 7 日至 2015 年 7 月 13 日,全国旅游景区质量等级评定委员会分 29 批共批准了 201 家景区为国家 5A 级旅游景区。请依据附件 6(从国家旅游局官网上收集的国家 5A 级旅游景区评定的相关信息)和附件 7(国家旅游局官网上收集的国家 4A 级景区名单)的信息,更为合理地为该旅游爱好者规划十年的旅游计划。

2 问题分析

2.1 整体分析

依据题目所给的条件和信息及要求解的四个问题,整体来讲四个问题研究的都是图论中的组合优化问题。为了解决图论组合优化问题,首先要确定图中的顶点、边及边上的权值。我们可把各个旅游景点和各省会城市视为图中的顶点,到达景点和省会城市的道路或公路视为图中的边,旅行时间或费用等视为图中边的权值,这样就形成了旅行问题中的加权网络图。由于问题中涉及的景点很多,采用传统的简单网络加权图的最佳推销员(TSP)问题很难求解,所以我们利用最近邻聚类 and 分层、分块优化的思想,先建立具有区块划分的加权网络图;然后建立不同的优化模型,并研究其求解算法,以解决题目所给的相应问题。整体示意图见下图 1。

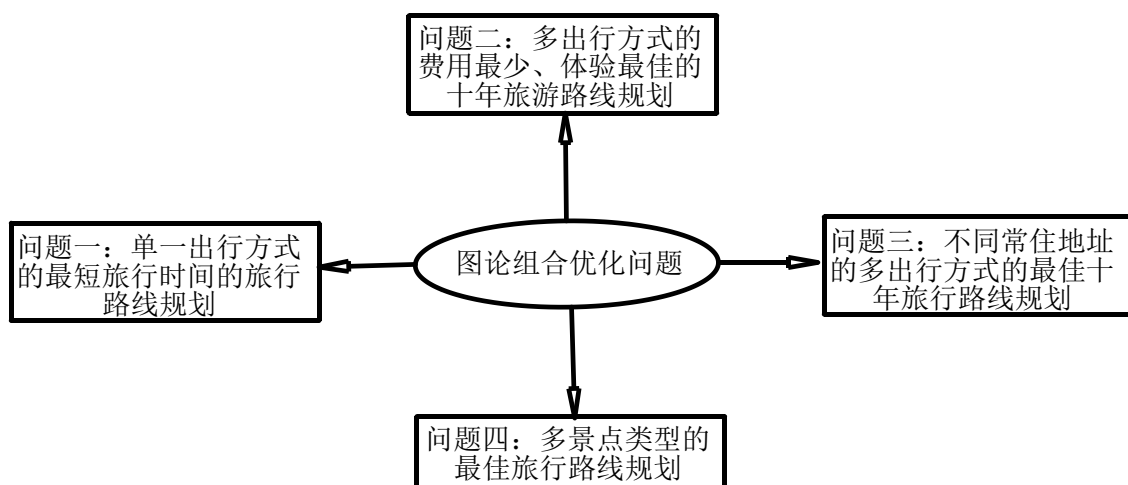


图 1 整体示意图

2.2 对每个问题的分析

由于每旅行一次，就形成一个哈密尔顿圈，一年可能旅行多次，所以将此旅游路线规划问题转化为 MTSP 问题。利用双层的规划的思想便能得到最佳路线规划。

（1）对问题一的分析

由于本题已知各景区到相邻城市的道路和行车时间参考信息，国家高速公路相关信息，各省会城市之间高速公路路网相关信息，所以可以从中得到各个景点之间的行驶时间和旅游时间。依据在行车线路的设计上采用高速优先的策略，我们首先可给旅行者制定到一个省旅行的景点旅行最佳路线；然后利用每次旅行时间不超过 15 天，为旅行者制定各省市的旅游先后顺序；最后利用旅游者每年有不超过 30 天的外出旅游时间，每年外出旅游的次数不超过 4 次，制定每年的旅行次数和每次的旅游省市。这样便能确定游遍 201 个 5A 级景区至少需要的年数和具体行程。

（2）对问题二的分析

在问题一的基础上，问题二中对旅行者的出行方式综合考虑了全程自驾的方式及先乘坐高铁或飞机到达与景区相邻的省会城市、再采用租车的方式自驾到景区游览。为了使旅游者费用最优、旅游体验最好，并且在十年游遍所有景区，首先可以基于各区块内的最小旅游时间将用车费和住宿费先确定；然后对各区块间考虑选择满足题目要求的出行方式和路线规划使得费用最少，建立基于出行时间的最小费用旅游路线规划模型；其次在费用保证很小的前提下，尽量使得在省与省之间的出行时间尽量少，让其剩余的时间都用来增加各景点的至少游览时间；最后利用此费用最少和景点游览时间尽量多的旅游路线，便能给出十年游遍所有景区的每一次的具体路线。

（3）对问题三的分析

在问题二的基础上，问题三需要对问题二中的模型进行推广。由于问题三要求对常住地址为北京市的旅游者进行十年旅游路线规划，而旅游者的常住地址的变化，会导致区块网络图的变化，相应的最佳旅游路线规划也会随之改变。因此，在问题二的基础上建立动态网络加权图对任意位置为出发点都能规划出最优旅游路线。

（4）对问题四的分析

在问题二、三的基础上，增加了上千个 4A 级景区。由于旅游者在旅行的过程中，并不一定是以 5A 级优先旅行这个原则来对景点排序，而往往旅游者是通过对比景点的相应指标与自身旅游偏好差别，进行旅游路线的优先选择。因此 4A 级景区的增加，就导致旅游者在旅游时，不仅要考虑旅游过程中花费最优、游览体验最好，而且还要考虑旅游过程中 4A 与 5A 级景区的优先级选择。于是，本题首先通过分析附件 6、7 中的旅游景区评定的相关信息，建立模糊综合评价模型，确定旅游者对每个景点的优先级排序；然后再针对此优先级景点按问题二中的方法进行寻找最优旅游路径。

3 模型的假设与符号说明

3.1 模型的假设

全文假设	<ul style="list-style-type: none"> ✧ 在高速公路上的车辆平均行驶速度为 90 公里/小时，普通公路上行驶速度为 40 公里/小时，并且行车时间限定于每天 7:00 至 19:00 之间，景区开放时间统一为 8:00 至 18:00； ✧ 旅游者总的旅游次数越少越好； ✧ 旅游爱好者计划在每一个省会城市停留 24 小时，以安排专门时间去游览城市特色建筑和体验当地风土人情。
问题一的补充假设	<ul style="list-style-type: none"> ✧ 游览景点之后，旅游者都回到该景点所在省的省会，走高速公路进行返程； ✧ 旅游者每天都是 7 点开始出发到景点后，如果景点开放，则立即游览；若到达之后还未到 8 点，则距 8 点的时间间隔忽略不计； ✧ 每个景区的游览时间就认定为附件 1 给出的至少游览时间； ✧ 地球为球形。
问题二的补充假设	<ul style="list-style-type: none"> ✧ 各个旅游景点内没有旅馆，每次只到当地省、市或县的旅馆进行住宿； ✧ 对于每一区块旅游的时间长短，不会受高铁或飞机选择方式而影响； ✧ 乘坐高铁或飞机的时间限定在每天 7:00 至 19:00 之间； ✧ 对剩余时间进行按比例分配，但所产生的费用不考虑。
问题三的补充假设	<ul style="list-style-type: none"> ✧ 自驾游爱好者的旅游路线一般是尝试首先从自驾车旅游者的居住周边开始，逐步向远辐射。
问题四的补充假设	<ul style="list-style-type: none"> ✧ 影响旅游者的对景点选择的因素只有：景点主题、景点知名度、景点环境、景点交通； ✧ 旅游者只选择自身偏好较好的景点进行旅行，其余景点不旅行。

3.2 模型的符号说明

关键符号	符号说明
d_{ij}	第 i 景点到第 j 景点的距离
t_{ij}	第 i 景点到第 j 景点的行车时间
w_{ij}	第 i 个景点与第 j 个景点连线的时间权值
x_{ij}	旅游者从第 i 个景点是否到第 j 个景点
D_{lk}	第 l 区块到第 k 区块的距离
T_{lk}	第 l 省到第 k 省的高速行驶时间
W_{lk}	区块间连线的时间权值
C_{lkp}	采用第 p 种行车方式从点 l 到点 k 间的费用权值
x_{lkp}	旅游者以第 p 种行车方式从第 l 个点是否到第 k 个点
注： $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ， n 为景点个数； $l, k \in \{1, 2, \dots, m\}$ ， m 为区块个数	

4 模型的建立与求解

4.1 问题一的模型建立与求解

根据 2 中问题的分析, 利用图论中的组合优化和最优化的理论和方法, 下面首先分别建立旅游网络图、基于 TSP 问题的各区块内景点的最佳旅游路线规划模型、基于 MTSP 的改进寻求各省最佳旅游路线模型和旅游总年数的规划模型, 然后研究它们的解法。

4.1.1 旅游网络图的建立

(1) 网络加权图的构建

对于一个图论组合优化问题, 首先需要确定图中的顶点、边、边上的权值。在本问题中, 我们将各个景点以及各个省会城市所在位置作为图中的顶点, 共 232 个点; 将各省会城市之间的高速公路和各省会城市到景点的公路及景点之间的公路作为图中的边; 将边上的权重分为以下几类: 各景点的至少游览时间, 景点与景点之间的行车时间; 如果边的一个连接点为省会城市所在点, 则权重除以上两个时间外还包括在该省会城市的停留时间 24 小时。基于以上思想, 建立以下旅游网络示意图 (仅部分), 如图 2 所示。

(2) 分块网络加权图的构建

为了得到最佳的旅行方案, 先要对如图 1 所示的网络图进行区块划分。按照旅游者的心理, 一般是追求一次性旅游多个景点, 因此利用聚类的思想将较为接近的景点聚为一类。利用经纬度给出各点地理坐标, 令网络图中景点 A 的地理坐标 (x, y) , 若 A 所在省会地点坐标为 (x_0, y_0) , 除去 A 点所在省会的其他省会地点的地理坐标为 (x_i, y_i) , $i \neq 0$, 其中 i 为除去 A 点所在省会的其他省会地点的标号。如果 A 点的坐标满足下列公式(1), 则将 A 点归到以第 i 省会地点为中心的一类景点。

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq \varphi \quad (1)$$

其中, φ 为聚类阈值。按照这种邻近聚类的思想, 我们便可形成以省会地点为中心的子区块的旅游子区块网络图。

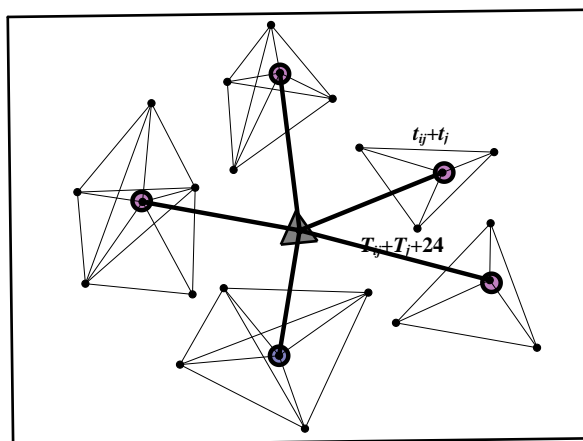


图 2 旅游网络图

注: 图中“▲”表示旅行者出发点, “●”表示省会城市所在点, “●”表示各个景点所在位置。

通过旅游网络图进行聚类处理后, 可获得分块网络加权图。在该图中, 可先对每一个区块的旅游景点规划进行讨论, 得出花最少时间游完每个区块的最佳旅游路线; 然后

再对整个网络图进行旅游规划，则可得到游遍整个 5A 景点的旅游规划方案。

4.1.2 基于 TSP 问题的各区块内景点的最佳旅游路线规划模型

对于某个区块进行分析，在局部网络图中，首先需要确定各边上的时间权值；然后再基于此权值进行旅行路线规划。

(1) 区块内景点间连线的时间权值的确定

由于景点与景点之间的路包括高速公路和普通公路，为了行驶时间方便计算，则将高速公路转化为普通公路。在高速公路上的时速为 90 公里/小时，普通公路上的时速为 40 公里/小时，则转化方法是：1 公里的高速公路等价于 2.25 公里。利用此转化方法，景点与景点间的路都为普通公路。令 d_{ij} 表示第 i 景点到第 j 景点的距离， $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，其中 n 为该区块景点个数，则各个景点间的行车时间 t_{ij} 为：

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v} \quad (2)$$

由于在普通公路上的行车平均速度为 40 公里/小时，则将 (2) 式中的 v 取 40。

考虑到各个景点的至少游览时间不同，有的为“半天”，有的为“一天”，还有的为“两天”。此处将时间转化成按小时为基本单位，令 t_j 为第 j 景区的至少游览时间，则 t_j 取值为 4、8 或 16 小时。

故第 i 个景点与第 j 个景点连线的时间权值 w_{ij} 为：

$$w_{ij} = t_{ij} + t_j; i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

其中， n 为该区块网络中的景点个数。

(2) 区块内的旅游路线规划模型

为了寻找最佳旅游路径，首先考虑去寻找每个区块的最佳景点旅游路线；然后再寻找整个旅游网络的最佳旅游路线。若某区块的景点，加上省会所在点，则局部的旅游网络图就是由这些点构成的网络图。现在就是去寻找从该省会所在点为起点的一个最小哈密尔顿圈^[5-7]。因此，建立基于 TSP 问题的各区块的最佳旅游路线规划模型如下。

决策变量的确定：为了找到最佳旅游路线，确定决策变量为 x_{ij} ， x_{ij} 表示旅游者从第 i 个景点是否到第 j 个景点，即：

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{旅游者从第 } i \text{ 个景点到第 } j \text{ 个景点;} \\ 0, & \text{旅游者从第 } i \text{ 个景点不到第 } j \text{ 个景点.} \end{cases} \quad (4)$$

总共有 n 个景点，则 $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

目标函数的确定：由于旅游者想花最少的时间旅游完所有的景点，则将目标函数确定为时间最少。令 w_{ij} 为该省景点 i 与 j 间的时间权值，则目标函数为：

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

约束条件的确定：由于旅行对时间约束比较严格，因此将约束确定以下 8 个。

约束条件一：每个景点旅行一次。每个景点只出去一次，也只进来一次。则：

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (6)$$

约束条件二：在旅行过程中不形成回路。由于在任意景点子集中不形成回路，令 S 为景点子集。即：

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq n - 1, S \subset \{1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

其中， $|S|$ 为集合 S 中的元素个数。

约束条件三：每次旅游时间的约束。由于旅游者要求每次旅游时间不超过 15 天，也就是说共有 180 个小时可以利用，即：

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (t_{ij} + t_j) x_{ij} \leq 180 \quad (8)$$

其中， t_{ij} 为行车时间， t_j 为第 j 景区的至少游览时间。

约束条件四：行车时间点和景区开放时间约束。每天行车时间只能在 7 点至 19 点，景区每天开放时间为 8 点至 18 点。

基于假设，旅游者每天都是 7 点开始出发到景点后，如果景点开放则立即游览；若到达之后还未到 8 点，则距 8 点的时间间隔忽略不计。而在游览景点结束后，若时间还有剩余，但是剩余时间又不足以使得旅游者到达下一个景点并游览，则此距离 18 点的剩余时间也作为游览该景点的时间。这样便只需保证每天的行车时时间为 7 点至 19 点。若 $x_{ij} = 1$ ，则一定会经过 j 地，令 y_{kj} 为第 k 天是否选择 j 地进行游览，即：

$$7 + \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} + \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_j \leq 19 \quad (9)$$

约束条件五：每天开车时间约束。每天开车时间不超过 8 个小时，即：

$$\sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} \leq 8 \quad (10)$$

约束条件六：全天游览的开车时间和半天游览的开车时间约束。若旅游者将要旅行的景点至少需要游览时间为“全天”，要求开车时间不超过 3 个小时。若旅游者将要旅行的景点至少需要游览时间为“半天”，要求开车时间不超过 5 个小时，即：

$$\text{若 } \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_j = 8, \text{ 则 } \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} \leq 3 \quad (11)$$

$$\text{若 } \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_j = 4, \text{ 则 } \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} \leq 5 \quad (12)$$

为了计算方便，将此约束转化为：

$$\sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} \leq -\frac{1}{2} \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_j + 7 \quad (13)$$

约束条件七：决策变量 x_{ij} 只能取 0 或 1，即：

$$x_{ij} \in \{0,1\}; i, j \in \{1,2,\dots,n\} \quad (14)$$

综上所述，建立基于 TSP 问题的各个省内景点的最佳旅游路线规划模型为：

$$\begin{aligned} \min \quad & Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq n-1, S \subset \{1,2,\dots,n\} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (t_{ij} + t_j) x_{ij} \leq 180 \\ 7 + \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} + \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_j \leq 19 \\ \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} \leq 8 \\ \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_{ij} \leq -\frac{1}{2} \sum_i \sum_j y_{kj} x_{ij} t_j + 7 \\ x_{ij}, y_{kj} \in \{0,1\}; i, j \in \{1,2,\dots,n\} \end{cases} \end{aligned}$$

其中， w_{ij} 为边上的时间权值，包括行车时间和至少游览时间。利用此模型可以规划出每个区块内的最佳旅游路线。

但是如果考虑到每次旅行的时间必须不超过 15 天，即白天共有 180 小时可以利用。令该省旅游最小时间为 Z_{\min} ，旅行者常住地点到该省的行车时间为 T ，并且在每个省的省会有停留时间 24 小时。若 $Z_{\min} + 2T + 24 \geq 180$ ，则旅行者不可能一次性将该区块的所有景点都游览。故利用贪心的原则，可以将剩余的景点归到距它较近的下一个区块。利用此模型再对下一个区块进行旅游路线的规划。

4.1.3 基于 MTSP 的改进寻求各省最佳旅游路线模型

在建立区块旅游网络加权图后，先确定网络图中的区块间连线的时间权值；然后，建立基于 MTSP 改进模型，寻求各省最佳旅游路线，得出整个旅游网络中的最佳旅游路线。

(1) 区块间连线的时间权值的确定

由以上分析，可以得到第 k 个区块内的旅游路线和在该区块的具体旅游时间 Z_k 。假设现在共有 m 个区块，即有 m 个省， $k=1,2,\dots,m$ 。构造出各区块所构成的旅游网络图，如下图所示。

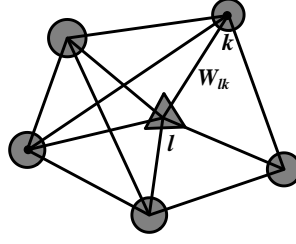


图 3 各区块的旅游网络图

图中的权值 W_{lk} 表示时间权值。其确定如下：

首先，利用附件 3 中的若干省会城市之间高速公路路网相关信息，令 D_{lk} 表示第 l 地到第 k 地的距离， $l, k \in \{1, 2, \dots, m\}$ ，其中 m 为总的区块个数，则两省会城市间的行车时间 T_{lk} 为：

$$T_{lk} = \frac{D_{lk}}{v} \quad (15)$$

由题目假设可知，在高速公路上的车辆平均行驶速度为 90 公里/小时，即 v 取 90。

然后，根据以下三种时间来确定时间权值。包括区块内的景点旅游时间、省与省之间的高速行驶时间以及在省会的停留时间、在省会的停留时间为 24 小时（只利用白天的 12 小时）。令旅游者在第 k 省的景点旅游最小总时间为 Z_k ，第 l 省到第 k 省的高速行驶时间为 T_{lk} 。因此，时间权值 W_{lk} 为：

$$W_{lk} = Z_k + T_{lk} + 12; \quad k, l \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (16)$$

（2）各区块的旅游路线规划的改进 MTSP 模型

一般来讲，泛化的 MTSP 问题^[8]定义为：给定一个 n 个结点的城市集合，让 m 个旅行商各自从一个城市出发，每位旅行商访问其中一定数量的城市，最后回到其出发城市，要求每个城市至少被一位旅行商访问一次并且只能一次，问题的目标是求得访问 m 条环路代价最小访问次序，其中代价可以是距离、时间、费用等，问题中称旅行商出发的城市称为中心城市，其它城市称为访问城市。而 MTSP 问题又分为四种类型，其中有一种是 m 个旅行商从同一个城市出发访问其中一定数量的城市，即只有一个中心城市，使得每个城市必须被某一个旅行商访问而且只能访问一次，最后回到出发城市。

由于旅行者不可能一次性游览所有省，于是就有多次往返，每一次往返就构成一个哈密尔顿圈。总共构成多个哈密尔顿圈，则就可以将此问题转化 MTSP 问题。并且每次旅游出行时间不超过 15 天，故建立以下改进的 MTSP 优化模型。

决策变量的确定：假设 $X_{lk}^{(p)}$ 为旅游者第 p 次旅行是否从第 l 省到第 k 省，即决策变量为：

$$X_{lk}^{(p)} = \begin{cases} 1, & \text{旅游者第 } p \text{ 次旅行从第 } l \text{ 省到第 } k \text{ 省;} \\ 0, & \text{旅游者第 } p \text{ 次旅行不从第 } l \text{ 省到第 } k \text{ 省.} \end{cases} \quad (17)$$

目标函数的确定：在满足限制条件下，总的旅行时间越少越好，即每次旅行的最小时间之和最小。由于上 (16) 式可知各边上的时间权值为 W_{lk} ，以 p 次旅行的总时间 $T(p)$

为目标函数，即：

$$\min T(p) = \min \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m W_{lk} X_{lk}^{(p)} \quad (18)$$

约束条件的确定：由于整个旅行要求较多，因此将个区块的旅行约束确定有以下 5 种约束。

约束条件一：每个省只经过一次。旅行者到每个省只出去一次，也只进来一次，即：

$$\sum_{k=1}^m X_{lk}^{(p)} = 1, \sum_{l=1}^m X_{lk}^{(p)} = 1 \quad (19)$$

约束条件二：在旅行过程中不形成回路。由于在任意区块子集中不形成回路，令 S 为区块子集。即：

$$\sum_{l \in S} \sum_{k \in S} X_{lk}^{(p)} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq m - 1, S \subset \{1, 2, \dots, m\} \quad (20)$$

其中， $|S|$ 为集合 S 中的元素个数。

约束条件三：决策变量 $X_{lk}^{(p)}$ 只能取 0 或 1，即：

$$X_{lk}^{(p)} \in \{0, 1\}; l, k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (21)$$

其中， k 需要通过总最佳哈密尔顿圈的个数来确定。

约束条件四：旅游时间约束。每次旅行，旅游者游览总时间不超过 15 天，此处应该理解为 180 个小时，则每次旅行的总时间需要满足以下条件：

$$\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m W_{lk} X_{lk}^{(p)} \leq 180 \quad (22)$$

约束条件五：路线约束。旅行者若第 p 次旅行从第 l 省到第 k 省，则第 q 次 ($q \neq p$) 旅行一定不可能从第 l 省到第 k 省，即：

$$\text{若 } X_{lk}^{(p)} = 1, \text{ 则 } X_{lk}^{(q)} = 0. \quad (23)$$

上式也可以理解为不可能两次都到同一个省。为了方便计算，将此约束变形为：

$$X_{lk}^{(p)} + X_{lk}^{(q)} \leq 1; (q \neq p) \quad (24)$$

综上所述，得到以下改进的 MTSP 模型：

$$\min T(p) = \min \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m W_{lk} X_{lk}^{(p)}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{k=1}^m X_{lk}^{(p)} = 1, \sum_{l=1}^m X_{lk}^{(p)} = 1 \\ \sum_{l \in S} \sum_{k \in S} X_{lk}^{(p)} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq m - 1, S \subset \{1, 2, \dots, m\} \\ X_{lk}^{(p)} \in \{0, 1\}; l, k \in \{1, 2, \dots, m\} \\ \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m W_{lk} X_{lk}^{(p)} \leq 180 \\ X_{lk}^{(p)} + X_{lk}^{(q)} \leq 1; (q \neq p) \end{cases}$$

通过以上的分析，我们可以得到 r 个最佳哈密尔顿圈以及每个最佳哈密尔顿圈的总时间 C_s , $s=1, 2, \dots, r$ 。此处每一个圈就表示一次旅行，由于旅游者要求每一年最多 4 次旅行，并且每年最多旅行时间为 30 天（每天按 12 小时计算）。对于这 r 个最佳哈密尔顿圈的时间，建立以下优化模型，在 4.1.4 节建立优化模型，规划出旅游总年数和每年每次的旅游路线。

4.1.4 旅游总年数的规划模型

如果没有每一年外出旅游的次数不超过 4 次和不超过 30 天的限制，那么游遍所有 201 个 5A 级景区的年数最多需要 r 年。但问题要求的是在以上两个限制条件下，游遍所有景区的最少年数。利用规划旅游路线等价于从 r 个最佳哈密尔顿圈分堆组合成满足条件约束的组合方案，因而此处问题可以转化为：对于 r 个最佳哈密尔顿圈的时间，如何进行分堆？使得每个堆的时间个数不超过 4 个，并且每堆内的总时间尽量接近 30 天（每天按 12 小时计算）。

设第 s 个旅行路线的时间值为 C_s , $s=1, 2, \dots, r$ 。令游遍所有 201 个 5A 级景区所需要的至少总年数为 u , $1 \leq u \leq r$ ；令 Y_{sh} 为是否将第 s 个旅行路线归为第 h 年旅行，若 $Y_{sh} = 1$ ，则将第 s 个旅行路线归为第 h 年旅行；若 $Y_{sh} = 0$ ，则将第 s 个旅行路线不归为第 h 年旅行。

目标函数的确定：既要追求游遍所有 201 个 5A 级景区的年数尽可能的少，又要每年旅行的时间尽量接近 30 天，即 360 小时。因此考虑如下两个目标：

目标函数一：游遍所有景区的年数尽量少，则目标为：

$$\min u \quad (25)$$

目标函数二：每年旅行的时间尽量接近 30 天，则目标为：

$$\min 360 - \sum_{s=1}^r C_s Y_{sh} \quad (26)$$

为了便于求解，我们将多目标转化为单目标：为了避免量纲和数量级的差异，作以下处理，得到目标为：

$$\min \frac{u}{r} + \frac{360 - \sum_{s=1}^r C_s Y_{sh}}{360} \quad (27)$$

约束条件的确定：由于每个旅行路线只能归为某一年旅行，并且每年的旅游路线最多 4 条（也就是最多 4 次旅行），每年旅行时间不超过 30 天。所以将约束表示为：

$$\sum_{h=1}^u Y_{sh} = 1; s = 1, 2, \dots, r \quad (28)$$

$$\sum_{s=1}^r Y_{sh} \leq 4 \quad (29)$$

$$\sum_{s=1}^r C_s Y_{sh} \leq 360 \quad (30)$$

综上所述，建立最少旅游年数的优化模型为：

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{u}{r} + \frac{360 - \sum_{s=1}^r C_s Y_{sh}}{360} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{h=1}^u Y_{sh} = 1; s = 1, 2, \dots, r \\ \sum_{s=1}^r C_s Y_{sh} \leq 360; Y_{sh} \in \{0, 1\} \\ \sum_{s=1}^r Y_{sh} \leq 4 \\ 1 \leq u \leq r \end{cases} \end{aligned}$$

这样便能够得出，游遍 201 个 5A 级景区至少需要几年，以及每一次旅游的具体行程。

4.1.5 问题一的模型求解与结果分析

(1) 算法思想与求解步骤

算法思想：对本题的旅游路线规划，我们采用分层和分块优化的思想，建立了一个旅游网络加权图模型和二一个旅游路线规划和游遍所有景点所需总时间的优化模型。针对第一个模型，首先，利用各个景点以及各个省会城市所在位置的经纬度信息，转化为它们的地理坐标，并进行编号；然后将各个景点按临近省会地点进行预分类；其次再利用最近邻算法和聚类的思想将各个景点进行二次划分，形成以省会城市为中心的分区块景点图；最后依据 4.1.2 和 4.1.3 中赋权的方法，构建出分块加权网络图。为便于模型二和三的求解，通过距离和时间的转换关系，采用一个时间矩阵表示网络加权图。对模型二的求解，首先采用元胞数组的方法，从距离矩阵中挑出对应每个区块内加权图的距离子矩阵；然后利用改进的求解 TSP 的模拟退火算法对每个区块进行最佳旅游路线的规划，寻找出每个区块内的旅游路线时间都不会超过 15 天的最佳旅游路线。对模型三的求解，首先采用元胞数组的方法，从时间矩阵中挑出对应各个区块（省会城市）间加权图的时间子矩阵，并加以修改；然后利用改进的求解 MTSP 的模拟退火算法，求出从出发地到

各省会城市并游完它所含景点，再回到出发地形成的哈密尔顿圈的游览总时间；其次对这些哈密尔顿圈的时间进行判定，若有一个尽量接近了 15 天，则将其标记为一个最佳哈密尔顿圈，其路线就可作为一次旅游规划路线；否则就增加一个区块进行游览，再利用模拟退火算法对各个区块进行最优组合，规划每次旅行的区块，使它们的旅游总时间不超过 15 天且尽量接近 15 天；依此方法，就可求出游完所有景点的 r 个最佳哈密尔顿圈以及每个最佳哈密尔顿圈的总时间 C_s 。对模型四，将所得到的所有最佳路线（ r 个最佳哈密尔顿圈）分配到具体的某一年，主要用分堆的思想，得出游遍所有 201 个 5A 景点至少需要的年数和每一次的具体行程。具体步骤如下，算法流程见图 4。

算法步骤：

Step 1 首先进行数据处理，由于题目中关于景点、城市和省会的距离信息太少，故先在百度上查找了上述地点的地理信息（经纬度）并进行编号，以西安市为起点和终点，编号为 1，景点编号为 2~202，其他省会城市编号为 203~232，共 232 个点。再通过假设地球为球形，由几何关系，求出任意两点之间的距离，得到距离矩阵。

$$d = R \arccos [\cos(x_1 - x_2) \cos y_1 \cos y_2 + \sin y_1 \sin y_2] \quad (31)$$

其中， $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 为两个点的地理坐标， $R = 6370km$ 为地球半径。

Step 2 对题目中给出的 201 个 5A 景点按省进行预分块，共分成 31 个区块，处理原则为尽量选择省会城市周围的景点构成一个区块，获得各个区块内景点的编号。

Step 3 在每一个小区块内选择相应的省会城市作为该区块的起点和终点，中间点由该小区块内各景点的序号组成，构成一个向量，方便调用距离矩阵中的距离信息。在模型中已经将省会与省会之间统一为高速公路（ $v = 90km/h$ ），而省会与景点、景点与景点之间都转化为普通公路（ $v = 40km/h$ ），故在区块内部的距离和时间是等价的，前面所述的时间赋权矩阵与此处的距离赋权矩阵是相似的，计算得到的最短距离便对应着最短的时间。

Step 4 针对改进的 TSP 模型，根据求解 TSP 模型的模拟退火算法，提出了改进的模拟退火优化方法以寻找每个区块内的最优线路。由于该问题是在 TSP 中增加了如下附加条件——基于安全考虑，行车时间限定于每天 7:00 至 19:00 之间，每天开车时间不超过 8 小时；在每天的行程安排上，若安排全天游览则开车时间控制在 3 小时内，安排半天景点游览，开车时间控制在 5 小时内；在高速公路上的行车平均速度为 90 公里/小时，在普通公路上的行车平均速度为 40 公里/小时；该旅游爱好者计划在每一个省会城市至少停留 24 小时，以安排专门时间去游览城市特色建筑和体验当地风土人情（不安排景区浏览）；景区开放时间统一为 8:00 至 18:00，所以建立了解决此问题的改进的 TSP 模型，故在用模拟退火算法寻优时，提出了对应的改进方法，即在原求解 TSP 模型的模拟退火算法的每次循环中，都增加了对附加条件进行判断的方法。如果满足条件，则继续执行；若不满足条件，则跳入下一次循环。由聚类分析以省会为中心共得到了 31 个区块，在外循环中调取元胞数组中的景点序列得到对应的距离矩阵，再由改进的模拟退火算法在每个区块内进行寻找判断并得到一个时间最优的结果，共需调取 31 次，便可得到每个区块内的最优景点游玩顺序，最优时间和最优路程。

Step 5 针对改进的 MTSP 模型，根据求解 MTSP 模型的模拟退火算法，提出了改进的模拟退火优化方法以寻找各区块间的最优线路。先采用元胞数组的方法，从时间矩

阵中挑出对应各个区块（省会城市）间加权图的时间子矩阵，并加以修改；然后利用改进的求解 MTSP 的模拟退火算法，求出从出发地到各省会城市并游完它所含景点，再回到出发地形成的哈密尔顿圈的游览总时间；其次对这些哈密尔顿圈的时间进行判定，若有一个尽量接近了 15 天，则将其标记为一个最佳哈密尔顿圈，其路线就可作为一次旅游规划路线；否则就增加一个区块进行游览，再利用模拟退火算法对各个区块进行最优组合，规划每次旅行的区块，使它们的旅游总时间不超过 15 天且尽量接近 15 天；依此方法，就可求出游完所有景点的 r 个最佳哈密尔顿圈以及每个最佳哈密尔顿圈的总时间 C_s 。

Step 6 利用分堆和穷举的方法，二次寻优求出游遍所有 201 个 5A 景点至少需要的年数和每一次的具体行程。主要根据题目中给出的一次出游最多 15 天，一年最多四次且不超过 30 天，确定所需的最少时间。

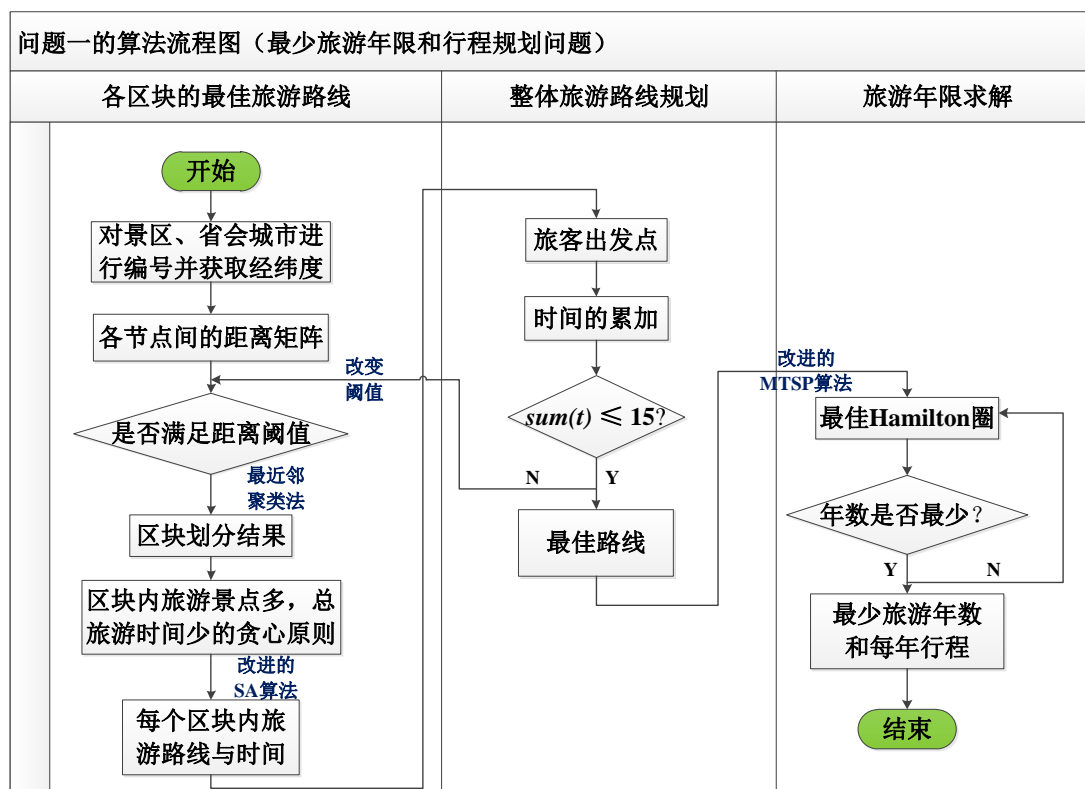


图 4 问题一的算法流程图

(2) 结果求解

在求解此最少旅游年限和具体旅游路线规划问题时，利用 Matlab12.0 编程求解，程序见附件 4。其运行环境见下表。

表 1 运行环境说明表

硬件环境	操作系统	Windows XP
	主频	2.79GHZ
	内存	2GB
软件环境	软件	Matlab12.0
	重要算法	模拟退火算法

结果一：聚类后区块网络划分结果

按照邻近聚类的思想，便可形成以省会地点为聚类中心重新划分的旅游子区块网络图和表。图 5 给出了以黑龙江和吉林省及它们周边的景点为例，说明聚类前后旅游子区块网络图的变化情况；表 2 给出了以河北、辽宁、山东及它们周边的景点为例，说明聚类前后各个景点的分区块变化情况，表中黑体阴影所示景点是聚类后从其他区块增加到这几个区块中的一个区块内的景点。其余各区块划分的景点的结果表请见附件 1。

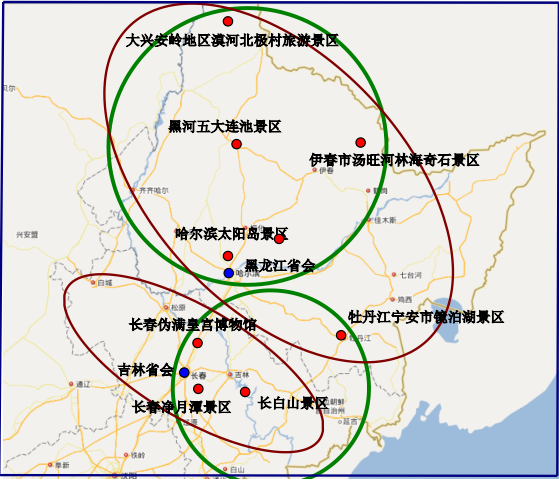


图 5 聚类后区块网络划分图

注：在图 5 中，椭圆部分表示聚类前的自然省分区块图，圆形部分表示聚类后的区块划分图（为了显示更加清楚，仅给出黑龙江、吉林省的局部划分情况）。

表 2 聚类后区块网络划分表

聚类的景点区块	各区块类的景点
河北	承德避暑山庄及周围寺庙景区、保定安新白洋淀景区、大同云冈石窟（位于山西省）、保定涞水县野三坡景区、石家庄平山县西柏坡景区、忻州五台山风景名胜区(位于山西省)
辽宁	沈阳植物园、大连老虎滩海洋公园、大连金石滩景区、秦皇岛山海关景区（位于河北省）、本溪市本溪水洞景区
山东	泰安泰山景区、烟台蓬莱阁—三仙山—八仙过海旅游区、济宁曲阜明故城三孔旅游区、青岛崂山景区、安阳殷墟景区（位于河南省）、威海刘公岛景区、烟台龙口南山景区、枣庄台儿庄古城景区、济南天下第一泉景区、山东沂蒙山旅游区
以三个区块为例，其余区块具体景点见附录	

通过以上图表，可以看出有些景点就由属于其它省市的子区块网络景点归到了新的子区块网络。

结果二：最佳旅游方案（包括旅游年数、每次的旅游具体行程与路线）

基于以上区块网络图，根据前面的算法思想和求解步骤，并用 *Matlab* 软件编程计算，得到要游遍 201 个 5A 景点至少需要的旅游年数为 11 年。在这 11 年内要旅行 29 次，这 29 次每次旅游的时间见下表 3。

表 3 中，“北京、天津，14.77” 表示的含义为从西安市到北京区块游览所有景点后，再去天津区块游览所有景点，最后回到西安市的一次旅行；此次旅行总花费的时间至少为 14.77 天（满足每次旅行不超过 15 天的要求）；其他的含义类似。

对此 29 次旅行进行最佳组合，得到 11 年中每一年需要旅行的省市区块以及时间，

见表 4。

表 3 每次旅行的时间表（单位：天）

地点	北京、天津	河北	山西	内蒙古	辽宁	吉林
旅行时间	14.77	8.86	6.40	6.07	11.23	12.93
地点	黑龙江	上海	江苏	浙江	安徽	福建
旅行时间	10.46	8.42	7.65	8.26	10.38	12.79
地点	江西	山东	河南	湖北	湖南	广东
旅行时间	8.56	9.24	9.25	8.88	8.55	9.63
地点	广西	海南	重庆	四川	贵州	云南
旅行时间	9.61	11.38	11.60	10.65	9.48	10.26
地点	西藏	陕西	甘肃、青海	宁夏	新疆	
旅行时间	8.82	7.00	14.90	7.41	12.83	

表 4 在 11 年中每一年需要旅行的省市区块以及时间表（单位：天）

旅行年（次数）	每次旅行区块中心	每次旅行时间	年旅行时间
第 1 年 (共旅行 3 次)	河北	8.861126	26.323
	陕西	7	
	黑龙江	10.46226	
第 2 年 (共旅行 3 次)	重庆	11.59852	27.833
	西藏	8.824141	
	宁夏	7.410648	
第 3 年 (共旅行 3 次)	辽宁	11.22798	28.350
	江苏	7.645123	
	贵州	9.477157	
第 4 年 (共旅行 3 次)	安徽	10.37741	25.335
	山西	6.404182	
	湖南	8.553476	
第 5 年 (共旅行 3 次)	海南	11.38121	25.873
	内蒙古	6.074435	
	上海	8.417673	
第 6 年 (共旅行 3 次)	江西	8.555224	27.046
	山东	9.24474	
	河南	9.245615	
第 7 年 (共旅行 3 次)	浙江	8.260276	26.749
	广西	9.608268	
	湖北	8.880868	
第 8 年 (共旅行 3 次)	北京 天津	13.77	26.697
	吉林	12.92692	
第 9 年 (共旅行 3 次)	新疆	12.82986	23.090
	云南	10.26048	
第 10 年 (共旅行 2 次)	四川	10.65347	20.289
	广东	9.634719	
第 11 年 (共旅行 2 次)	福建	12.78878	27.208
	甘肃 青海	14.42	

下面以常住陕西西安市的旅游者，去河北省及其景点旅游的具体旅行方案（包括每天旅行方案）为例，示意说明每一次旅游的具体行程。见下图 6 和表 5。其余每次旅行的具体行程见附件 2。

表 5 每次旅行的具体行程表（以游览河北省区块的景点为例，单位：小时）

每天的具体行程				总时间
第 1 天	西安	7.08h 637km	石家庄（河北省会）	7.08
第 2 天	石家庄	1.4h 56km	西柏坡（8h）	9.4
第 3 天	西柏坡	1.85h 74km	五台山（8h）	9.85
第 4 天	五台山	1.47h 132km	大同云冈石窟（4h）	5.45
第 5 天	大同云冈石窟	2.28h 206km	野山坡（8h）	10.28
第 6 天	野山坡	2.35h 212km	承德避暑山庄（8h）	10.35
第 7 天	承德避暑山庄	2.6h 234km	白洋淀（8h）	10.6
第 8 天	白洋淀	1.68h 152km	石家庄（河北省会）	1.68
第 9 天	石家庄	7.08h 637km	西安	7.08

注：“*”表示行车时间和里程。“()”表示在该景点的游览时间。
*

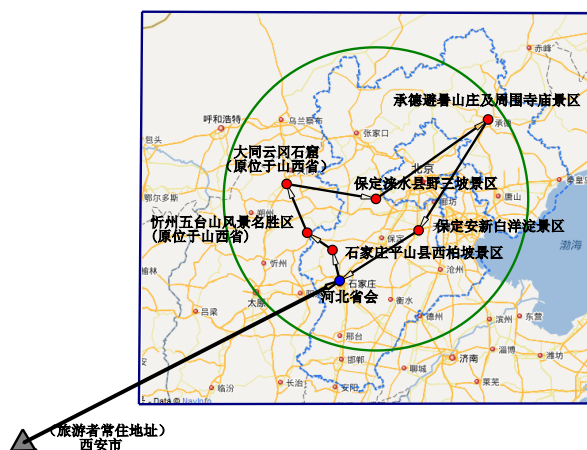


图 6 以游览河北省区块景点为例的具体行程图

4.2 问题二的模型建立与求解

在问题一的基础上，问题二中对旅行者的出行方式综合考虑了全程自驾的方式及先乘坐高铁或飞机到达与景区相邻的省会城市、再采用租车的方式自驾到景区游览。当选定各区块之间的出行方式（只能一种）后，由于在各区块内的最佳旅游路径是固定的，所以在各区块内旅游的总时间也就确定了，从而相应的用车费用（如果选择自驾，则只含油费；如果采用其他出行方式，则包括油费和租车费）和住宿费用也就确定了。因此第二问主要是对各区块之间的乘车方式和路线进行最优规划，故第二问的建模过程思路确定为如下示意图，见图 7 所示。

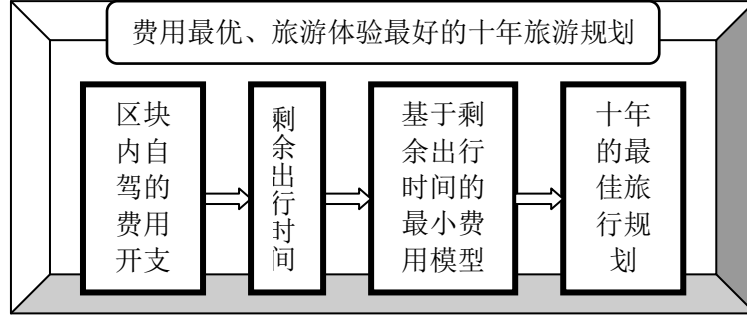


图 7 问题二的建模过程流程图

4.2.1 各区块内的租车、耗油、住房费用的计算模型

按照问题一中对各区块的分析所得到的最佳旅行路线和时间，虽然现在是租车自驾，但在该区块和问题一中的开车自驾是走相同的路线。因此可以得到在该区块所产生的租车费用、耗油费用和住宿费用。

(1) 对于租车费用的讨论

当开车自驾时，只产生耗油费，不产生租车费用。

当选择的出行方式是乘坐高铁或飞机，则利用题中已给出租车费用 300 元/天，对租车费用进行计算。若第 k 个区块的最少旅游时间为 Z_k ，则在第 k 个区块所待的天数 h 为：

$$h = \left\lceil \frac{Z_k}{12} \right\rceil \quad (32)$$

上式中， $\lceil \rceil$ 表示向上取整。于是各区块的总租车费 M 为：

$$M = \sum_{k=1}^m (h \times 300) \quad (33)$$

(2) 对于耗油费用的讨论

由于各区块内景区的道路既含有高速公路又含有普通公路，它们的每公里油耗是不同，所以为了便于处理计算，我们利用单位费用将高速公路的路长转化为普通公路的路长，比如：6 公里的高速公路就等于 10 公里的普通公路路长。这样就将区块内的公路全部转化为普通公路，从而就可统一按普通公路的耗油平均价格 0.6 元/公里进行油耗费用计算。令第 k 个区块的旅游总路程为 L_k ， $k=1,2,\dots,m$ ，总共有 m 个区块。则在第 k 个区块所花费的租车费用 D_k 为：

$$D_k = L_k \times 0.6 \quad (34)$$

各区块的总耗油费 D 为：

$$D = \sum_{k=1}^m D_k \quad (35)$$

(3) 对于住宿费的讨论

题中给出住宿费分为以下几种情况：省会城市和旅游景区 200 元/人·天，地级市 150

元/人·天，县城 100 元/人·天。基于假设，各个旅游景点内没有旅馆，每次只到当地省、市或县的旅馆进行住宿。记设在第 k 个区块内，第 i 天停留的景点所在地所花费的住宿费为 V_{ki} ， $i=1,2,\dots,h$ ，则各区块的总住宿费 V 为：

$$V = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^h V_{ki} \quad (36)$$

因此，在各区块的总费用 ϕ 为：

$$\phi = M + D + V \quad (37)$$

4.2.2 旅行 10 年期限中剩余出行时间的计算模型

对于每一区块旅游的时间长短，不会受高铁或飞机选择方式而影响。由于每年最多有 30 天的外出旅游时间（即 360 小时），为了达到题中所提出的旅游体验要最好的要求，则十年的旅行，就相当于有 3600 小时的时间可以用来旅行。

若第 k 个区块内的最少旅游时间为 Z_k ，则总的剩余出行时间 T 为：

$$T = 3600 - \sum_{k=1}^m Z_k \quad (38)$$

接下来就是要对这剩余出行时间内进行选择适合的出行方式，使得剩余出行时间尽可能用完（即旅游体验最好），但是费用也要可能的少。于是进行以下最佳出行方式的路线规划。

4.2.3 基于出行时间的最小费用的旅游路线规划模型

（1）网络图中权值的确定

此处的旅游网络图中的权值有别于问题一，原因是时间权值和选择的出行方式有关，而现在的出行时间又是固定的，需要追求出行费用最少。因此，将网络图中的权值定为费用权值，每两个区块间网络图的边的权值是如下三种费用之一。三种费用为乘坐高铁费用、乘坐飞机费用和自驾费用。令网络图中第 l 个点与第 k 个点连线的边上采用第 p 种出行方式的费用权值为 C_{lkp} ，其中 $p=1$ 表示为乘坐高铁； $p=2$ 表示为乘坐飞机； $p=3$ 表示为自驾。在选择高铁方式出行时，为考虑题目对乘坐时间不超过 6 小时的限制，我们首先将超过乘坐时间 6 小时的高铁方式去掉。

（2）决策变量的确定

为了找到最佳旅游路线，确定决策变量为 x_{lkp} ， x_{lkp} 表示旅游者是以第 p 种方式从第 l 个点是否到第 k 个点，即：

$$x_{lkp} = \begin{cases} 1, & \text{旅游者是以第 } p \text{ 种方式从第 } l \text{ 个点到第 } k \text{ 个点;} \\ 0, & \text{旅游者是以第 } p \text{ 种方式从第 } l \text{ 个点不到第 } k \text{ 个点.} \end{cases} \quad (39)$$

其中，网络图中总共有 m 个点， $l, k \in \{1, 2, \dots, m\}$ ； $p=1, 2, 3$ ，表示三种不同的出行方式。

（3）目标函数的确定

由于旅游者想花最少的费用旅游完所有的景点，则将目标函数确定为费用最少。令 C_{lkp} 为采用第 p 种方式从点 l 到点 k 间的费用权值，则目标函数为：

$$\min C = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m C_{lkp} x_{lkp} \quad (40)$$

由于题目中说到，设计一个十年游遍所有 201 个 5A 景区、费用最优、旅游体验最好的旅游线路。为了让旅游体验最好，因此，此处的出行时间可以让它尽可能的小，让其多余的时间可以用来增加各区块的景点游览时间，使其可以尽量达到问题一中各景点的至少游览时间的两倍；但是时间越少所产生的出行费用就越高，因此要使费用和时间都尽量达到最佳，从而第二个目标为出行时间与最大剩余出行时间的相对误差最小。若第 l 个点到第 k 个点选择了第一种方式，即 $p=1$ ，那么，此时可令第 l 个点到第 k 个点的时间为 t_{lk1} ；同理，若 $p=2$ ，则第 l 个点到第 k 个点的时间为 t_{lk2} ；若 $p=3$ ，则第 l 个点到第 k 个点的时间为 t_{lk3} ，于是第二个目标可表为下式：

$$\min \frac{T - \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m t_{lkp} x_{lkp}}{T} \quad (41)$$

(4) 约束条件的确定

类似以上问题一中的 TSP 问题的基本约束，建立以下约束条件：

$$\sum_{k=1}^m x_{lkp} = 1, \sum_{l=1}^m x_{lkp} = 1 \quad (42)$$

$$\sum_{l \in S} \sum_{k \in S} x_{lkp} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq m - 1, S \subset \{1, 2, \dots, m\} \quad (43)$$

$$x_{lkp} \in \{0, 1\}; l, k \in \{1, 2, \dots, m\}; p \in \{1, 2, 3\} \quad (44)$$

综上所述，建立以下基于出行时间的最小费用的旅游路线规划模型：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m C_{lkp} x_{lkp} \\ & \min \frac{T - \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m t_{lkp} x_{lkp}}{T} \\ & s.t. \begin{cases} \sum_{k=1}^m x_{lkp} = 1, \sum_{l=1}^m x_{lkp} = 1 \\ \sum_{l \in S} \sum_{k \in S} x_{lkp} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq m - 1, S \subset \{1, 2, \dots, m\} \\ x_{lkp} \in \{0, 1\}; l, k \in \{1, 2, \dots, m\}; p \in \{1, 2, 3\} \end{cases} \end{aligned}$$

4.2.4 各景点体验最好的旅游时间

求解 4.2.3 节建立的多目标改进 TSP 模型能够得到 10 年内最少的出行时间，由此便能得到 10 年内游遍所有 5A 景点剩余的游览时间。因为本题要求各景点游览时间为了让

旅游者的旅游体验最好，所以我们将剩余的游览时间进行合理分配用以增加各区块的景点游览时间，使其可以尽量达到问题一中各景点的至少游览时间的两倍。为了解决此问题，可以考虑如下两种剩余游览时间的分配方案。

方案一：首先确定各区块的旅游时间占总时间的比例，得到每个区块可分得的剩余游览时间；然后确定各个景点至少游览时间占区块游览时间的比例；最后将区块分得的剩余游览时间按各景点至少游览时间占区块游览时间的比例进行分配，获得新的各景点至少游览时间。

方案二：按顾客的个人旅游偏好进行自我决定。

为便于制定最佳可行旅游线路方案，本文在不考虑新增费用的前提下，主要按方案一对剩余时间进行按比例分配，以此规划旅游路线方案。

4.2.5 问题二的模型求解

(1) 算法思想与求解步骤

根据第二个问题建模的思想，在组合后的 29 个区块内，给定了出行方式以及在不同地方（省、市和县）的住宿费用，故在第一问中得出的最优路线也即是费用最少的路线，换言之，每个区块内部的费用已经固定了，则可按照前面 4.2.1 的方法计算出。解决问题二的关键就是求解在 4.2.2 和 4.2.3 针对起点（西安市）到各个区块中心城市费用和时间的优选问题建立的两个目标的改进 TSP 模型。为此首先运用“分层序列法^[9]”将其转化为两个单目标的 TSP 模型；然后针对起点到不同的区块中心城市的出行方式（自驾（问题一中的情况）、飞机和高铁）有多种选择的排列组合问题，所以用穷举法解决它们，获得费用最优、旅游体验最好的旅游路线方案。求解步骤如下：

Step 1 对数据进行预处理。

- 1) 由于起点到某些区块中心城市不完全具有自驾、飞机和高铁三种方式，或者时间上不能满足题干要求，排除这些数据；
- 2) 合并过的区块，由于包含多个省会城市，在处理时进行了叠加和重组。以北京—天津区块为例，起点到北京市有高铁，而到天津是没有的，而在在该种情况下选择高铁既省钱又省时间，因此，在路径选择时，先从起点乘高铁到北京，按最优路线游玩后再回到北京，再从北京乘高铁返回起点；
- 3) 考虑到同一段路程自驾时间比其他方式的时间多得多，故在自驾费用的计算时要加上在途中的住宿费用，而对于飞机和高铁这两种方式由于时间都是小于半天的，故在起点到区块中心城市路段上不考虑住宿费用。

Step 2 利用分层序列法，把改进的多目标 TSP 模型变成两个单目标 TSP 模型。

以第一个目标（旅游费用最小）为目标，约束相同的单目标 TSP 模型（式 45）和以第二个目标（出行时间与最大剩余出行时间的相对误差最小）为目标，约束为在原约束基础上，加上 $\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m C_{lkp} x_{lkp} \leq C^1$ ，其中 X^1 和 C^1 分别为（式 46）的最优解和最优目标值（最优费用）。

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m C_{lkp} x_{lkp} \\
& s.t. \begin{cases} \sum_{k=1}^m x_{lkp} = 1, \sum_{l=1}^m x_{lkp} = 1 \\ \sum_{l \in S} \sum_{k \in S} x_{lkp} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq m-1, S \subset \{1, 2, \dots, m\} \\ x_{lkp} \in \{0, 1\}; l, k \in \{1, 2, \dots, m\}; p \in \{1, 2, 3\} \end{cases} \quad (45)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \min \frac{T - \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m t_{lkp} x_{lkp}}{T} \\
& s.t. \begin{cases} \sum_{k=1}^m x_{lkp} = 1, \sum_{l=1}^m x_{lkp} = 1 \\ \sum_{l \in S} \sum_{k \in S} x_{lkp} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq m-1, S \subset \{1, 2, \dots, m\} \\ x_{lkp} \in \{0, 1\}; l, k \in \{1, 2, \dots, m\}; p \in \{1, 2, 3\} \\ \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m C_{lkp} x_{lkp} \leq C^1 \end{cases} \quad (46)
\end{aligned}$$

Step 3 用穷举法求解模型（式 45）和（式 46），获得费用最优、旅游体验最好的旅游路线方案。

- 1) 将费用和时间分别设为第一、第二重要目标。由于数据量不是很大，可在编程中用穷举法找到费用最低的 10 个出行方式组合和对应的时间；
- 2) 在上一步中得到的 10 个出行方式组合的时间序列中找到时间最小的那种出行方式组合；
- 3) 计算整个游玩过程中的费用。

问题二的算法流程图，见下图 8。

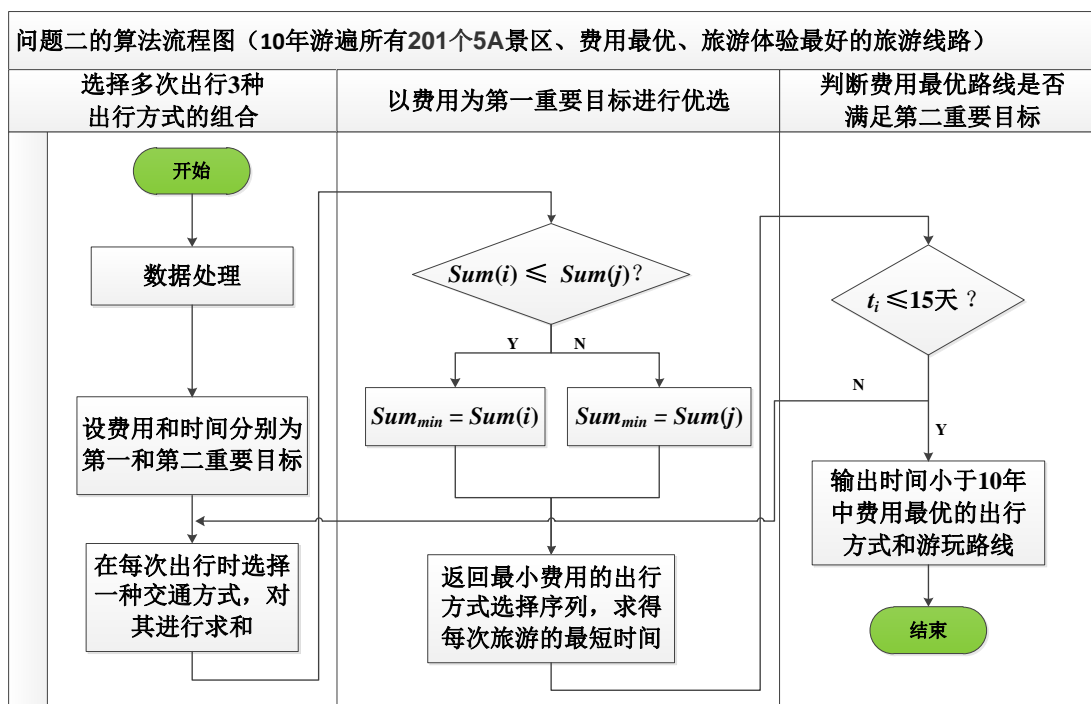


图 8 问题二的算法流程图

(2) 求解结果

综合考虑全程自驾出行或先乘坐高铁或飞机到达省会城市再租车自驾到景区出行方式，利用 MATLAB 编程计算得到以下结果：十年游遍所有 201 个 5A 景区的最小费用；旅游体验最好的每一次旅游线路；每次具体出行方式；每一天的出发地；每个景区的游览时间。

十年游遍所有 201 个 5A 景区的最小费用为：32.6 万元（百位忽略不计）

基于篇幅，此处给出其中一次的旅游路线以及具体出行方式（以去北京、天津省区块为例），见下表 6、表 7、图 9。其余每次旅行的具体旅行规划，见附件 2。为了体验最好，按 4.2.4 中的方案一进行时间分配，此处也给出了该区块中每个景区的游览时间（满足每个景点的游览时间不超过其至少游览时间的两倍）。

表 6 北京、天津省区块中每个景区的游览时间表

景区代号	景区名称	旅游时间 (h)
1-1	故宫博物馆	5.3
1-2	天坛公园	4.124
1-3	颐和园	5.3
1-4	八达岭—慕田峪长城旅游区	5
1-5	明十三陵景区(神路-定陵-长陵-昭陵)	5
1-6	恭王府景区	5.3
1-7	北京奥林匹克公园	4.47
2-1	天津古文化街旅游区（津门故里）	6
2-2	天津蓟县盘山风景名胜区	11.5

表 7 去北京、天津省区块旅行的具体路线

行程	路线				费用(元)
第 1 天	西安	$\frac{5.61h(高铁)}{950km}$	北京	$\frac{1.43h}{57.3km}$ 1-4 (3.87)	1415.5
第 3 天	1-4(1.13)	$\frac{0.89h}{35.7km}$	1-5 (5)	$\frac{0.69h}{27.8}$ 1-7 (1.87)	938.1
第 4 天	1-7(2.6)	$\frac{0.06h}{2.7km}$	1-3 (5.3)		901.62
第 5 天	1-3	$\frac{0.28h}{11.5km}$	1-6 (5.3)	$\frac{0.07h}{2.8km}$ 1-1 (2.614)	908.58
第 6 天	1-1(2.68)	$\frac{0.086h}{3.44km}$	1-2(4.124)	$\frac{1.02h}{92.1km}$ 2-2(0.1)	694.164
第 7 天	2-2(8)		...		600
第 8 天	2-2(3.4)	$\frac{2.6h}{104km}$	2-1(2)		962.4
第 9 天	2-1(4)	$\frac{0.22h}{8.94km}$	天津	$\frac{2h(飞机)}{}$ 西安	1085.34

注：其中“1-5 (5h)”表示在明十三陵景区(神路-定陵-长陵-昭陵)游览 5h。其余景点代号的景点名称见上表 6。



图 9 去北京、天津省区块旅行的具体路线图

4.2.6 结果分析与检验

本题所计算出的是十年游遍所有 201 个 5A 景区，费用最优、游览体验最好的旅游路线。为了验证此游览路线是否达到这样的效果，此处利用三种情况与之进行对比，其中包括全程租车自驾、优先选择高铁再租车自驾、优先选择飞机再租车自驾。

对于四种情况，利用其旅游总费用、出行总时间以及各景点的游览时间进行对比，得到以下结果对比表，见表 8。

表 8 结果对比表（金额忽略百位数）

	旅游总费用	在景点的游览总时间
本题求解结果(1)	32.6 万元	273.9 天
全程自驾 (2)	41.5 万元	236.27 天
优先选择高铁 再租车自驾 (3)	37.2 万元	267.18 天
优先选择飞机 再租车自驾 (4)	38.6 万元	284.4 天

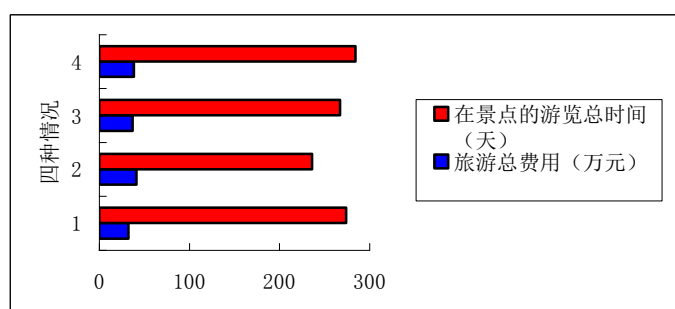


图 10 结果对比的条形图

通过以上表格可以看出，优先选择高铁或飞机，这两种方式都比全程租车自驾的出行时间少、游览时间多，但是费用相对要高一点。本题求解的结果是既保证了顾客出行时间少，景点游览时间多，又保证了旅游费用较少的一套最佳十年旅游计划。

4.3 问题三的模型建立与求解

问题三是在第二问所建立的模型基础上加以推广，为全国的自驾游爱好者规划设计类似的旅游线路，进而给出常住地在北京市的自驾游爱好者的十年旅游计划。由于在问题二中旅游者出发地点固定在西安，而本题中旅游者的出发位置与旅游者的常住地址有关，因此建立动态规划模型。首先构建基于旅游者的常住地址的旅游网络图；然后再根据旅游网络图利用问题二中建立相对应的优化模型及所用的求解思路，为旅游爱好者设计旅游路线方案，该方案能够达到出行时间和费用少、每个旅游景点的游览时间尽量多、让旅游者感到旅游体验最好的目的。

4.3.1 基于旅游者的常住地址的动态网络图

考虑到每次旅行的时间必须不超过 15 天。若旅行者不可能一次性将该区块的所有景点都游览，则利用贪心的原则，可以将剩余的景点归到距它较近的下一个区块。由于每位旅游者的常住地址可能不同，则为旅游者设计最佳旅游路线所基于的网络图就不同。因此构建动态的旅游网络图 $G(\delta)$ ，即：

$$G(\delta) = (V, E) \quad (47)$$

其中， δ 为每位旅游者的常住地址的标识符号。每个不同的 δ ，对应着不同的旅游网络图 $G(\delta)$ 。每种旅游网络图 $G(\delta)$ 中的点集 V 都是由各个景点以及省会地点构成，边集 E 都是由各个景点以及省会地点之间的连线构成。

4.3.2 基于自驾游的特点确定动态网络图中的权值

自驾游属于自助旅游的一种类型，是有别于传统的集体参团旅游的一种新的旅游形

态。对自驾车旅游者来说，旅游是一个学习与累积经验的过程。自驾游爱好者的旅游路线一般是尝试首先从自驾车旅游者的居住周边开始，逐步向远辐射^[10]。因此对于自驾游爱好者，旅游网络图中的权重确定有别于问题二。

自驾游爱好者在选择出行方式时，基于假设，去往旅游者居住地的邻接城市一般选择为自驾旅行，对于不邻接的城市，再考虑是自驾旅行还是乘坐高铁或飞机再租车旅行。因此，构造网络加权图分两步：

首先，对于自驾车旅游者的居住邻接城市构成的大区块，按自驾车费用进行赋权值。

然后，对于其余区块，按问题二中的 4.2.3 中的旅游网络图的权值确定方式，对网络图进行赋权值。

4.3.3 常住地址为北京市的旅游者的十年旅游规划结果

针对自驾游旅游者的特点，基于动态网络加权图，利用 MATLAB 编程计算，得到常住地在北京市的自驾游爱好者的十年旅游计划，具体结果包括：十年游遍所有 201 个 5A 景区的最小费用；旅游体验最好的每一次旅游线路；每次具体出行方式；每一天的出发地；每个景区的游览时间。

(1) 求解步骤

Step 1 数据处理，获得所有节点（起点、主要城市和景点）间在选择不同旅游方式下的时间和费用信息；

Step 2 由问题一中改进的模拟退火方法得到某次旅游的一系列节点间的最短路线；

Step 3 获得确定的路线后，问题三设计的是一个通用模型，面向对象是全国的自驾游爱好者，故在该问题中首先考虑主体（自驾游爱好者）的爱好及需求，即尽可能的为该群体选择自驾游形式的旅游类型，而这个问题同时也受时间和费用这两个主要因素的约束。在编程时，首先给自驾游爱好者设定在时间和费用上的可接受范围。简而言之，当其它旅游方式的时间和费用与自驾游所需时间和费用的差值超出某一数值时，则自驾游爱好者放弃以自驾游作为旅游方式。

$$\begin{cases} (t_i - t_{zi}) / t_{zi} \leq \theta_1; & \text{时间上可接受} \\ (m_i - m_{zi}) / m_{zi} \leq \theta_2; & \text{费用上可接受} \end{cases} \quad (48)$$

式中：

i —表示旅游景点的编号, $i = 1, 2, 3, \dots, m$ (m 为景点的总个数)；

t_{zi} , m_{zi} —表示自驾游花费的时间和费用；

t_i , m_i —表示以除自驾游以外的某种方式在第 i 个景点所需花费的时间；

θ_1 —时间上的接受上限，无量纲；

θ_2 —费用上的接受上限，无量纲。

根据自驾游爱好者的实际情况，引入两个权重系数 w_t 和 w_m (w_t : 时间权重系数； w_m : 费用权重系数)，当满足以下条件（式 49）时，则选择以自驾游作为旅游方

式，否则选择其它方式。

$$w_t \times \frac{t_i - t_{zi}}{t_{zi}} + w_m \times \frac{m_i - m_{zi}}{m_{zi}} \leq w_t \times \theta_1 + w_m \times \theta_2 \quad (49)$$

Step 4 按照该方法确定出选择自驾游的景点；然后在余下的景点中，在这种情况下具体选择哪一种旅游方式亦可采用（式 50）加权函数进行判断。

$$f(t_j, m_j) = w_t \times \frac{t_{\max} - t_j}{t_{\max}} + w_m \times \frac{m_{\max} - m_j}{m_{\max}} ; j = 1, 2, \dots \quad (50)$$

式中：

j — 表示旅游出行方式编号， $j = 1, 2, 3, \dots, n$ （ n 为旅游出行方式的总个数）；

t_{\max} , m_{\max} — 某个景点的出行方式中时间和费用的最大值；

t_j , m_j — 某个景点第 j 种旅游出行方式花费的时间和费用。

选择 $\max(f(t_j, m_j))$ 所对应的旅游方式。依此类推，确定余下各节点的旅行方式。

Step 5 这样便得到了一次旅游中最适合自驾游爱好者的旅游出行方式组合。

（2）常住地址为北京市的旅游者的十年旅游规划结果

十年游遍所有 201 个 5A 景区的最小费用为：21.7 万元（百位忽略不计）

基于篇幅，此处给出其中一次的旅游路线以及具体出行方式（以去四川省区块为例），见下表 9、表 10、图 11。其余每次旅行的具体旅行规划，见附件。此处也给出了四川省区块中每个景区的游览时间（满足每个景点的游览时间不超过其至少游览时间的两倍）。

表 9 四川省区块中每个景区的游览时间表

景区代号	景区名称	游览时间（h）
23-1	成都青城山—都江堰旅游景区	8.92
23-2	乐山峨眉山景区	5
23-3	阿坝藏族自治州九寨沟景区	9.2
23-4	乐山乐山大佛景区	5.3
23-5	阿坝藏族自治州松潘县黄龙风景名胜区	8.7
23-6	南充市阆中古城旅游景区	9
23-7	阿坝藏族自治州汶川特别旅游区	8.81
23-8	绵阳北川羌城旅游区	9.3

表 10 去四川省区块旅行的具体路线

行程	路线					费用(元)
第 1 天	北京	$\frac{2.5\text{h(飞机)}}{1545\text{km}}$	成都	$\frac{2.3\text{h}}{93.37\text{km}}$	23-6 (4h)	2346.022
第 2 天	23-6(5)	$\frac{1.7\text{h}}{159.53\text{km}}$	23-8(1.3)			845.718
第 3 天	23-8(8)		23-8			750
第 4 天	23-8	$\frac{2.3\text{h}}{89\text{km}}$	23-3(7.7)			1103.4
第 5 天	23-3(1.5)	$\frac{1.5\text{h}}{58.14\text{km}}$	23-2(5)			934.8
第 6 天	23-2	$\frac{2.1\text{h}}{195.8\text{km}}$	23-5(7.9)			795
第 7 天	23-5(0.8)	$\frac{0.3\text{h}}{14.9\text{km}}$	23-7(7)			758.94
第 8 天	23-7(1.81)	$\frac{1.19\text{h}}{47.45\text{km}}$	23-1(4)			928.2
第 9 天	23-1(4.92)	$\frac{1.08\text{h}}{43.43\text{km}}$	23-4(2)			925.8
第 10 天	23-4(3.3)	$\frac{2.2\text{h}}{74.8\text{km}}$	成都	$\frac{2.5\text{h(飞机)}}{1545\text{km}}$	北京	1734

注：其中“23-2（5）”表示在乐山峨眉山景区游览 5h，其余景点代号的景点名称见上表 9。

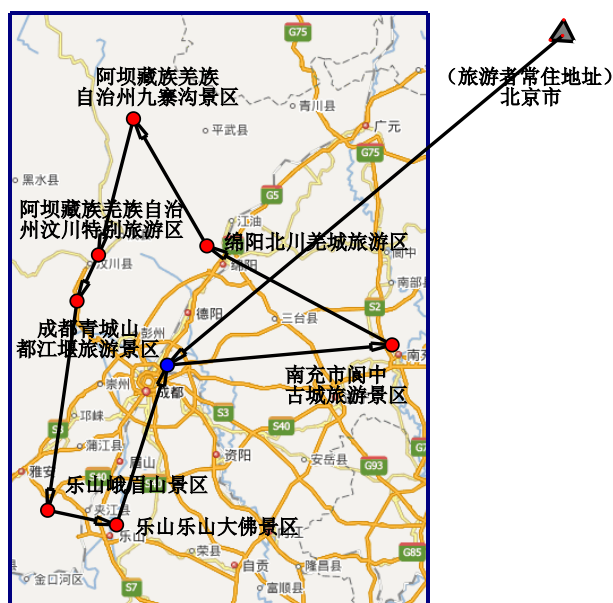


图 11 去四川省区块旅行的具体路线图

4.3.4 给旅游爱好者的建议

建议一：游客在出行时要考虑行车时间与目标景点的营业时间的问題，尽量避免到达景区时间为景区停止营业时间。

建议二：在出行时考虑自己的时间短优先还是费用低优先，根据自己的实际情况来选择适当的旅游路线。

4.3.5 给旅游有关部门的建议

通过分析以上结果，可对旅游有关的部门提以下几个建议：

（1）给旅行社的建议

在上述三问的结果中，分别给出了旅游爱好者全程自驾游或综合考虑自驾与乘坐高铁或飞机再租车自驾游遍 201 个 5A 景点的时间与费用。旅行社可以根据以上的结论计算的时间与费用来制定旅行社针对游客旅行某景点的收费标准，既要低于旅游爱好者自行旅游的费用，也要兼顾自己的营业利润与旅客的舒适程度，根据旅行的路程时间及景点的营业时间来合理地安排自己旅行社的参观旅游景点的顺序，尽可能地保证旅行者有较充足的时间来参观景点，做好对旅游者的服务，为旅游者介绍景点的特色及当地较为合理的饮食、住宿等消费场所。

（2）给旅游景点的建议

在前面问题的分析解决中发现旅游景点营业时间对于旅游者的旅游规划有一定的影响。由于夜间行车较为危险，所以旅游者行车在白天（7:00-19:00）进行，这与景区的营业时间（8:00-18:00）相冲突，这样就可能出现旅游者刚到达景区、景区就可能已经停止营业，旅游者不得不在第二天才能进景点参观旅游的问题，这样可能会导致浪费一些旅游者的时间。因此建议旅游景区可以选择较为安全的景点在夜间开放，增加景点夜间特色、文化特色及进一步提升景点观赏游憩价值、历史价值、文化价值、科学价值，来吸引游客，同时并适当地加强安保管，做好旅游景点区域内的各种服务工作。如果采纳了上述建议，那么旅游景点不仅可保证其营业额，而且也可以满足旅游者的参观要求、并能提升景点自身的吸引力和影响力。

此外，旅游景区要维持好交通秩序，保证交通的畅通便利，保证各项卫生标准，增设具有特色的景点来吸引顾客，购物、环境、经营管理等。

（3）给旅游局的建议

旅游管理局可以依据上面计算的结果，对旅游景区制定相应的引导政策，对旅游者提供相关的旅游信息和引导建议。如建议旅游景区适当地开放夜间景点；搜集景点相关的旅游信息、及时地公布旅游信息的实时情况，对旅游者给出较为准确的信息，尽量避免某些景点游客较多、某些景点游客较少，使游客尽量愉快地旅行。

（4）给景区周围商户的建议

游客一般出行都会考虑到时间与费用的因素，如果景区周边的饮食、住宿等生活条件较高，则游客可能就会选择不去或者尽量少去该旅游景区；如果景区饮食、住宿等生活条件较为合理，游客可能会选择多次旅游该景点，所以景区周围商户要在保证自身盈利的基础上适当地降低游客的生活消费水平，这样由于游客的增加会弥补单价减少带来的损失，从而达到增加盈利的效果。

（5）给交通部门的建议

由于以上问题给出了较为合理的建议，可能会有较多游客选择较为相仿的出行方式，这样可能会在某个区域带来交通的压力。建议交通部门要做好到景区各景点的道路建设规划，地方政府要给予支持；此外，交通部门要根据交通的实际交通境况给游客们提供较为及时的道路信息，避免游客的旅游路途的交通拥堵。

（6）给一些服务部门的建议

在以上问题出行路线的建议基础上，可能会出现某些主要的旅游干道上会有较多的游客，一些医疗卫生等服务部门要提供较为良好、充足的服务。

4.4 问题四的模型建立与求解

对于问题四，在问题二、三的基础上，增加了上千个 4A 级景点。4A 级景点的增加，就导致旅游者在旅游时，不仅要考虑旅游过程中花费最优、游览体验最好，而且还要考虑旅游过程中 4A 与 5A 级景点的优先级选择。因此，首先建立模糊综合评价模型，确定旅游者对每个景点的优先级排序；然后在针对此优先级景点进行寻找最优旅游路径。

4.4.1 基于旅游者的旅游偏好对 4A、5A 级景点进行模糊综合评判

由于旅游者在旅行的过程中，并不一定是以 5A 级优先旅行这个原则来对景点排序，而往往旅游者是通过对比景点的相应指标与自身旅游偏好差别，进行旅游景点的优先选择。因此通过模糊综合评判方法，对每个景区进行优先级排序。

评价模型一般需要确定五方面内容：评价者、评价对象、评价指标、权值系数以及评价方法。本题以旅游爱好者为评价者，景点为评价对象。

（1）评价指标的确定

旅游者的旅游偏好是对 4A 与 5A 级景点旅行优先级排序的重要影响因素。旅游偏好往往取决于旅游者的经济收入、年龄、性别、心理兴趣、职业、能力、文化程度、社会地位、常住地地理位置及自然条件等因素。由于旅游者的旅游偏好的不同，旅游者对旅游线路的优先选择也存在差别^[11-12]。比如：对于不同文化程度的旅游者，对旅游的偏好有着明显差别，反映在选择旅游线路时也会有比较明显的不同；而且旅游者的旅游愿望与对外部世界的了解一般成正相关，例如高学历的人基于他们对外部世界的了解，他们对去哪里、看什么目的性较强，选择旅游线路时有较强的自主性；中等学历及以下的人们产生旅游的愿望更多地受大众媒介的影响，他们对去哪里、看什么没有前者主动，更愿意接受旅行社的安排。

基于以上分析，将评价指标确定为：景点内容、景点知名度、景点环境、景点交通。

（2）基于旅游者的旅游偏好对 4A、5A 级景点进行模糊综合评判

模糊综合评判的一般步骤如下：

步骤一：确定评价对象的因素集合。基于以上对旅游者的旅游偏好分析，确定以四个评价指标作为评价对象的因素集合，则令因素集合 U 为：

$$U = \{\text{景点内容, 景点知名度, 景点环境, 景点交通}\} \quad (51)$$

步骤二：确定评价等级集合。旅游者对景点进行评价时，若对景点评价为很好，该旅游景点为优先选择旅行。因此，将评价等级集合 V 定为：

$$V = \{\text{很好, 好, 一般, 差}\} \quad (52)$$

步骤三：确定评价指标的权值。对于不同文化程度的旅游者，对旅游的偏好有着明显差别，选择旅游线路时也会有比较明显的反映。因此，景点内容对于旅游者的影响最大，比如旅游者非常喜欢旅游文化遗址，不喜欢由绚丽的娱乐场所构成的旅游景点，尽

管此景点是 5A 级景点，旅游者也不可能优先选择其进行旅行。因此，令评价指标的权系数矩阵 w 为：

$$w = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\} \quad (53)$$

权重反映各评价指标在综合评价中的重要性程度，且满足

$$\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1; 0 \leq \lambda_i \leq 1; i = 1, 2, 3, 4 \quad (54)$$

步骤四：建立模糊关系矩阵。由于旅游者的常住地址和社会地位的不同，评价矩阵也就有所不同，因此可以在某地区对同一社会地位的人进行抽样调查，得出每个城市的各个社会地位的旅游者大致的旅游偏好。假设，某一个城市中的某一类旅游者对旅游景点的评价矩阵 R 为

$$R = (R_1, R_2, R_3, R_4)^T = (r_{ij})_{4 \times 4} \quad (55)$$

其中， R_i 为第 i 个评价指标的单因素模糊评价向量， r_{ij} 表示某个旅游者从第 i 个因素来看对第 j 个评语等级模糊子集的隶属度， $i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。一个景点在第 i 个因素的表现是通过模糊向量 R_i 来刻画的， R_i 可以看作是因素集 U 和评语集 V 之间的一种模糊关系。

基于文献，在确定隶属关系时，通常是通过由专家或评价问题相关的专业人员依据评判等级对评价对象进行打分，然后统计打分结果，在根据绝对值减数法求隶属度^[13]。此处，由旅游者对景点进行打分，则 r_{ij} 的求解方法为：

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 1 - c \sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|, & i \neq j \end{cases} \quad (56)$$

其中， c 可以适当选取，使得 $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。

步骤五：进行模糊综合评价。通过权系数矩阵 w 与评价矩阵 R 的模糊变换，得到模糊评判集 B ，即：

$$B = w \circ R = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) \circ \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{pmatrix} \quad (57)$$

其中，“ \circ ”表示为模糊合成算子。进行模糊变换时要选择适宜的模糊合成算子，模糊合成算子通常有四种，此处选择其中一种算子 $M(\wedge, \oplus)$ 。

通过以上分析，先按旅游者的旅游偏好，对 5A、4A 级景点模糊综合评价后进行优先级排序；然后再对选择评价较好（包括“很好”和“好”）的景点进行最佳旅行路线规划。

4.4.2 基于优先旅游景点的最佳十年旅行路线规划

由于需要旅行的景点可以通过以上模糊综合评价挑选确定出来，所以对于这些景点

的最佳十年旅行规划，类似于问题 1、2，首先将这些景点进行区块划分，建立区块网络图；然后再对每个区块进行最佳路线的规划；其次对旅行者的出行方式考虑全程自驾，或先乘坐高铁或飞机到达与景区相邻的省会城市、再租车自驾的方式游览；最后对旅游者进行最佳十年旅行路线规划。

4.4.3 问题四的模型求解与分析

(1) 求解步骤

首先，针对不同类型的地区以及不同旅游偏好的旅游者对各个 4A、5A 级景区进行打分；然后，按公式 (54) 对分数进行处理，得到模糊关系矩阵 R ；其次，利用模糊综合评判的步骤，计算出旅游者对各个景点的优先级排序；最后，对所选景点利用 4.2.5 中的算法思想与步骤，进行最优路线规划。

由于景点打分具有随机性，并且我们在短时间内难以去做如此庞大的调查工作，因此利用 *Matlab* 软件进行随机模拟，生成一组打分数值，然后再利用此分数对景点进行综合评价，筛选出某一组需要旅行的景点。

(2) 求解结果

利用以上求解步骤，利用 *Matlab* 软件进行模拟，给出所需旅游的 4A、5A 级景区。见下表 11。

表 11 基于随机打分后筛选出的北京市的旅游景点

4A 级景区	4A 级景区	4A 级景区	5A 级景区
中国科学技术馆	中国紫檀博物馆	孔庙	颐和园
北京市规划展览馆	圆明园遗址公园	潭拓寺	八达岭
明城墙遗址公园	凤凰岭自然风景区	戒台寺	恭王府景区
八大处公园	世界花卉大观园	中山公园	故宫博物院
首都博物馆	石景山游乐园	什刹海风景	天坛公园
陶然亭公园	周口店遗址博物馆	北海公园	明十三陵景区
世界公园	中华民族园		

基于以上景点，为常住地址为北京市的自驾游爱好者规划最佳十年旅行路线。最后，给出一次旅行的路线图，如下图 12。

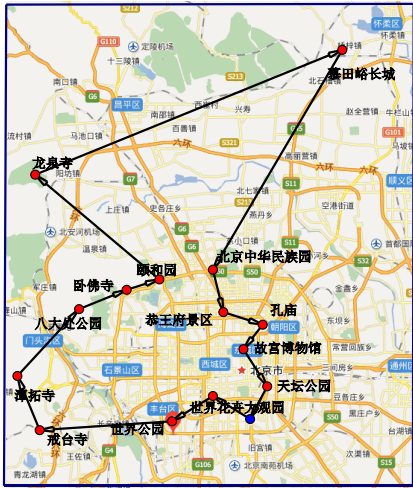


图 12 常住地址为北京市的一次旅行规划图

旅游者在旅行的过程中，并不一定是以 5A 级优先旅行这个原则来对景点排序，而往往旅游者是通过对比景点的相应指标与自身旅游偏好差别，进行旅游景点的优先选择。只需要对旅游者进行景点优先级排序后，利用此算法就能给出具体的旅游路线。

5 模型的评价与改进方向

5.1 模型的优缺点

模型的优点：

- [1] 本文在建立最佳旅游路线的优化模型时，套用比较简单、易懂的 TSP 模型、分堆模型等图论优化模型，简化了问题并降低了时间复杂度。
- [2] 将众多的时间约束进行了简化，使问题的求解更为简单。
- [3] 利用元胞数组存储各区块的大量景点相关数据，有利于 *Matlab* 软件的计算。
- [4] 在多目标优化模型中，将多目标转化为单目标，使得模型更加简化，计算更加方便。
- [5] 运行的数学软件比较单一、简便，只用 *Matlab* 软件就可以将旅游者的游遍所有景点的最少年数，以及费用最少的十年最佳旅行路线规划出来。
- [6] 利用 *Matlab* 软件求解整数非线性优化问题，在一定程度上降低了计算难度，并且能够求得比较优化的解。
- [7] 本文在对问题进行分析时，除了对问题进行定性分析外，还通过计算对问题进行定量分析，在一定程度上更具有研究价值。

模型的缺点：

- [1] 建立的模型是一个整数非线性优化模型，求解最优解时比较困难，而且利用的贪心算法得不到最优解。
- [2] 最后得到的优化方案，只得到了局部最优，而没有全局最优解。

5.2 模型的改进方向

改进方向 1：对于此旅游路线规划问题，本文假设的是在保证游遍所有景点的前提下，旅游者的旅游次数是越少越好，而实际有时针对不同的人对于旅游次数有不同看法。有的旅游者希望能多次外出游玩，每次少游览一些景点而多增加游览时间；而有的旅游者希望保证每个景点的游览时间下一次性游览更多的景点。因此在改进时，可以对每类人建立一个关于旅行偏好的模糊集。

改进方向 2：在问题二中，为了方便对住宿费的处理，假设了各个旅游景点内没有旅馆，每次只能到当地省、市、县的旅馆进行住宿。而实际上，每个旅游景点附近应该都有旅馆，因此在改进时，可以先确定各区块内旅馆位置，然后再将旅馆位置也作为旅游网络图中的点。

参考文献

- [1] 张志涌, 精通 Matlab6.5 版[M], 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.
- [2] 姜启源, 数学模型[M], 北京:高等教育出版社, 2005.
- [3] 曹旭, 旅游线路优化设计研究[D], 甘肃省兰州市西北新村 1 号:西北民族大学, 1-3 页, 2012 年 5 月.
- [4] 冉燕, 人文旅游线路优化设计探讨[J], 旅游纵览(下半月), 2014 年第 9 期:14-15, 2014 年 9 月.
- [5] 牟衍臣 谢东来等, 基于遗传算法航路规划 TSP 问题的研究[J], 系统仿真学报, 第 25 卷第 9 期:86-89, 2013 年 8 月.
- [6] 薛明昊, 列车旅行路线规划问询系统的研究与实现[D], 辽宁省沈阳市于洪区西环路:沈阳工业大学, 25-33, 2010 年 1 月.
- [7] 高海昌 冯博琴等, 智能优化算法求解 TSP 问题[J], 控制与决策, 第 21 卷第 3 期:241-246, 2006 年 3 月.
- [8] 俞庆生 林冬梅等, 多旅行商问题研究综述[J], 价值工程, 第 10 卷第 2 期:166-167, 2012 年 2 月.
- [9] 刘志斌 陈军斌等, 最优化方法及应用案例[M], 北京:石油工业出版社, 2013.
- [10] 于海波 吴必虎, 国外自驾游研究进展[J], 旅游学刊, 第 26 卷 3 期:55-59, 2011 年 3 月.
- [11] 陈启跃, 旅游者对旅游线路的选择[J], 镇江高专学报, 第 16 卷第 2 期:47-49, 2003 年 4 月.
- [12] 张邦俊 潘仲麟等, 风景区环境噪声的模糊综合评价[J], 中国环境科学, 第 14 卷第 3 期:182-184, 1994 年 6 月.
- [13] 李松槐 袁有霞, 定量评价指标隶属度的确定[J], 河南教育学院学报(自然科学版), 第 8 卷第 4 期:6-8, 1999 年 12 月.

附件清单

附件 1：问题一的具体结果

（聚类后的区块内的景点划分表、在 11 年中 29 次旅行每次旅行的具体安排表）

附件 2：问题二的具体结果

（在 10 年中 27 次旅行每次旅行的具体安排表）

附件 3：问题三的具体结果

（常住地址为北京市的旅游者，十年中 24 次旅游具有安排表）

附件 4：原 *Matlab* 程序代码

（包括四个问题的代码）

附录

problem1.m

问题一的主要程序，主要分为距离矩阵求解，模拟改进退火算法求解最短时间，以及二次优化等几个部分。

problem2.m

问题二的程序，在问题一的基础上，通过西安市到其它地点不同出行方式的费用和时间表，用分层序列法得到时间不超过 10 年，费用最优，体验最好的旅游方式。

problem3.m

问题三的程序，针对自驾游爱好者，为其设置选择自驾游方式的接受范围，并得到该范围满足该范围内的最优旅游出行方式组。

problem4.m

问题四的程序，包括对不同旅游者旅游偏好的模糊综合评判，再调用问题 1，2 的相应程序，寻找最佳旅游路线。